

УДК 532.517.4

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ**

© 2011 г.

*И.А. Крюков¹, Г.С. Глушко¹, Е.В. Ларина²*¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва²Московский авиационный институт

kryukov@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Высокоскоростные течения характеризуются сильной сжимаемостью и наличием узких зон больших градиентов параметров. Сжимаемость приводит к появлению новых эффектов по сравнению с несжимаемым случаем: сжимаемая диссипация, работа сил давления и поток массы. Наличие скачков в сверхзвуковом течении ведет к существенному росту производства турбулентности за счет градиентов средней скорости. Это приводит к заметному отклонению от равновесия вблизи скачков. Поэтому рассмотрены различные модификации двух- и трехпараметрических моделей турбулентности, учитывающие сжимаемость и неравновесность. Все предложенные модификации и некоторые их комбинации проанализированы на основе расчетов течений в сверхзвуковой недорасширенной струе со сложной ударно-волновой структурой и в сверхзвуковом сопле при наличии отрыва. Предложен вариант k - ϵ модели турбулентности, учитывающий сжимаемость и неравновесность и позволяющий рассчитывать оба рассмотренных класса течений с хорошей точностью.

Ключевые слова: сжимаемая турбулентность, неравновесные эффекты, высокоскоростные течения.

Моделирование турбулентности

В уравнение для кинетической энергии турбулентности явно входят дополнительные члены, связанные с эффектами сжимаемости. Это сжимаемая диссипация, работа сил давления (pressure-dilatation) и турбулентный поток массы. Они приводят к уменьшению энергии турбулентности и, следовательно, к уменьшению турбулентных сдвиговых напряжений в сжимаемых слоях смешения.

В работе [1] было проведено сравнение различных моделей сжимаемой диссипации и была выбрана модель, которая дает наилучшие результаты в случае сверхзвуковых струй со сложной структурой ударных волн.

Наличие газодинамических разрывов в поле течения приводит к тому, что вблизи разрывов появляются зоны существенного отклонения турбулентности от равновесия, т.е. когда порождение кинетической энергии турбулентности заметно больше скорости диссипации. Одним из наиболее значимых недостатков «традиционных» двухпараметрических моделей является то, что они плохо предсказывают характеристики турбулентности при заметном отклоне-

нии течения от равновесия. В [1, 2] исследовались различные модификации k - ϵ модели турбулентности, предназначенные для учета неравновесности турбулентности и имеющие относительно универсальный характер. На основе численного моделирования исследовалась возможность применения данных модификаций для течений со скачками и их «взаимодействие» с моделями сжимаемой диссипации.

Наличие больших градиентов средней скорости может приводить и к нарушению условия реализуемости напряжений Рейнольдса. В предложенном варианте [3] k - ϵ модели турбулентности использовалось ограничение на порождение энергии турбулентности, которое обеспечивает выполнение условия реализуемости.

Численный метод

Численный метод для решения осредненных уравнений Навье–Стокса совместно с уравнениями модели турбулентности построен на основе варианта метода Годунова повышенного порядка и подробно описан в [3]. Особое внимание в [3] уделено обеспечению физичности получаемых результатов.

Результаты расчетов

В работах [1, 2] на основе численного моделирования турбулентного течения в сверхзвуковых перерасширенных струях были проанализированы различные модели для сжимаемой диссипации и модели учета неравновесности. На рис. 1 показаны распределения давления Пито вдоль оси струи, которая экспериментально изучалась в [4]. Красным цветом показаны результаты, полученные с использованием предложенного варианта k - ϵ модели на двух разных сетках.

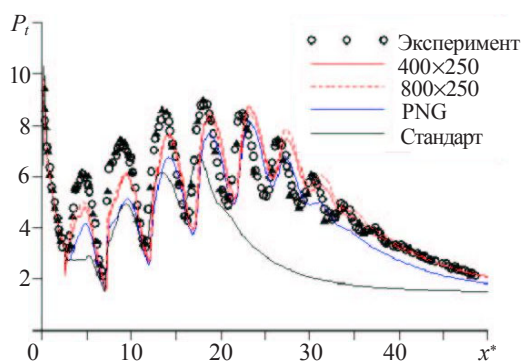


Рис. 1

Предложенный вариант модели широко использовался для расчета отрывных течений в соплах ракетных двигателей [5, 6]. На рис. 2 показано сравнение рассчитанного давления вдоль стенки плоского сопла с экспериментальными результатами работы [7]. Символами показаны экспериментальные данные, а сплошными линиями – расчет.

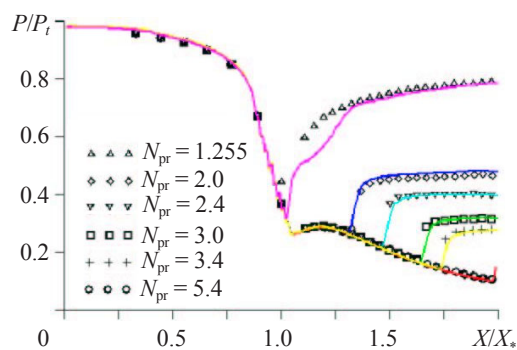


Рис. 2

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-01-00711.

Список литературы

1. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Расчет сверхзвуковых турбулентных течений // Препринт №793. ИПМех РАН, 2006. 36 с.
2. Крюков И.А. // Вестник МАИ. 2009. Т. 16, №2. С. 101–108.
3. Иванов И.Э., Крюков И.А. // Математическое моделирование РАН. 2009. Т. 21, №12. С. 103–121.
4. Zapryagaev V.I. et al. An experimental and numerical study of a supersonic-jet shock-wave structure // West East Yigh Speed Flow Fields 2002, CIMNE. Barselona, Spain, 2002. 6 p.
5. Семенов В.В., Иванов И.Э., Крюков И.А., Иванов П.Г. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. №3. С. 37–48.
6. Иванов И.Э., Крюков И.А. // Вестник МАИ. 2009. Т. 16, №7. С. 23–30.
7. Hunter C.A. Experimental, theoretical, and computational investigation of separated nozzle flows // AIAA Pap. 98-3107, 1998.

SOME PECULIARITIES OF MODELING TURBULENCE IN HIGH-SPEED FLOWS

I.A. Kryukov, G.S. Glushko, E.V. Larina

High-speed flows are characterized by strong compressibility and presence of narrow region of high gradients of parameters. The compressibility leads to a new phenomenon in comparison with the incompressible case: dilatation dissipation, work of pressure force and mass flux. Discontinuities in supersonic flow lead to considerable growth of turbulence production due to mean velocity gradients. It results in noticeable deviation from equilibrium in the vicinity of shocks. Therefore, different compressible and non-equilibrium modifications of two and three equations of turbulence models are considered in the paper. These modifications and some of their combinations are analyzed using numerical simulation of flow in and underexpanded supersonic jet with a complex shock-wave structure and a flow in a supersonic nozzle with separation. A new version of k - ϵ turbulence model is presented which takes into account both compressibility and non-equilibrium effect and which allows calculate both the considered variants with good accuracy.

Keywords: compressible turbulence, non-equilibrium effects, high-speed flows.